



Redish 教学法则及其启示

邓婉林 黄致新

(华中师范大学物理科学与技术学院, 湖北 武汉 430079)

摘要 作为美国物理教育研究领域的代表人物, 马里兰大学帕克分校的物理学教授 Edward F. Redish 在 2003 年出版了《Teaching Physics with the Physics Suite》一书, 推动了美国的物理教育研究改革运动。在该书中, Redish 提出了九条教学法则, 我们认为这些对我国的大学物理教学具有一定的启示, 因此本文对其进行了梳理和总结。Redish 认为, 在教学目标上, 教师应当强调教学本质, 帮助学生构建有效且科学的心智模型, 发展复杂的学习思维模式; 在教学评价上, 教师需要采用多元的考试题型, 激活学生不同的知识与技能; 在教学过程上, 教师应当注重师生关系, 尊重、关心、倾听学生。

关键词 Redish; 大学物理; 教学法则; 教学启示

REDISH'S TEACHING COMMANDMENTS AND ITS INSPIRATION

DENG Wanlin HUANG Zhixin

(College of Physical Science and Technology, Central China Normal University, Wuhan, Hubei 430079)

Abstract As one of the representatives of physics education researcher in America, professor Edward Redish, who is also a UMD distinguished Scholar-Teacher, published the book *Teaching Physics with the Physics Suite* in 2003, thus fueling the Physics Education Research (PER) movement. Redish presents his book with nine teaching commandments that are helpful for improving both teaching and learning of college physics, which are combed and summarized in this paper. To achieve teaching goals, he emphasizes the importance of teaching nature, building functional scientific mental models and developing sophisticated learning schemas for students. To assess individual students learning, he introduces eight types of exam and homework questions that activate different kinds of associations and resources. To deliver effective lectures, he is concerned with teachers respecting students, caring about students' learning and listening to them.

Key words Redish; college physics; teaching commandments; teaching inspiration

Edward F. Redish 是马里兰大学帕克分校的物理学教授, 美国物理学会、美国科学促进会、美

国物理教师协会和华盛顿科学院的成员, 曾获得过美国国家科学基金会颁发的杰出教学学者奖、

收稿日期: 2023-01-06

作者简介: 黄致新, 男, 教授, 主要从事物理教育研究, huangzx@mail.ccnu.edu.cn。

引文格式: 邓婉林, 黄致新. Redish 教学法则及其启示[J]. 物理与工程, 2023, 33(3): 3-9.

Cite this article: DENG W L, HUANG Z X. Redish's teaching commandments and its inspiration[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(3): 3-9. (in Chinese)

国际物理教育委员会奖章、奥斯特奖章、美国物理学会颁发的卓越物理教育奖等荣誉。2003年,作为物理教育研究改革运动(Physics Education Research movement)的代表人物之一,Redish 基于自己几十年的教学工作经历和物理教育领域的研究文献,撰写并出版了《Teaching Physics with the Physics Suite》^[1]一书,用于改进物理教学,帮助大学物理教师改善教学效果。在书中,Redish 提出了一些教学心得,以 Redish 的教学法则(Redish's teaching commandments)的形式呈现,共有九条。我们认为这些对我国的大学物理教学具有一定的启发作用,以下对这些教学法则的内容进行梳理、总结和探讨。

1 教学目标:认知与超越

1.1 心智模型

Redish 认为,大学物理教学不仅仅是完成教学大纲中的知识点,更重要的是将学生引导到一个充满可能性的未知的世界^[2]。教师需要从心智模型的角度出发,了解学生的思维是如何运作的。为此他提出了第一条教学法则:“大多数学生都不能自主构建有效且科学的心智模型,他们必须参与重复和多样的活动。”心智模型(mental models)指的是长期记忆中的要素与外在情境或刺激物相互作用所产生的内在表征,是对情境的结构化类比,是个体根据特定目的所形成的动态的认知结构^[3,4]。Redish 所提到的心智模型主要是指学生在面对物理情境时的认知模式,他希望物理教育可以帮助学生在心智模型上达到三个目标:概念,学生需要理解物理概念是牢固植根于现实世界中的;连贯性,学生能够将学过的物理知识建构成连贯的体系;功能性,学生应该学会在何时、如何运用所学的物理知识。

1.2 元认知

Redish 的第二条教学法则为:“为了让大多数学生学会如何学习物理,教师必须向他们提供明确的指导,使他们能够发展更复杂的学习思维模式。”学习思维模式(schemas for learning)是 Redish 对元认知(metacognition)含义的描述,其认知水平是心智模型的超越,是控制思维过程的思

维模式。国内学者一般认为元认知的实质是个体对当前认知活动的认知调节^[5],是学生对自己学习过程的反思和改进^[6]。教师应当从元认知的角度出发,帮助学生理解学习科学的意义以及他们应该如何学习科学。只有在更复杂的学习思维模式的基础上,学生才能真正构建出在第一条教学法则中提到的心智模型。

1.3 针对教学本质的教学方法

Redish 从心智模型和元认知的角度对大学物理的教学目标进行了分析,他认为教学的本质是培养出能够独立推理和思考的学习者,教师应当帮助学生构建有效且科学的心智模型,发展复杂的学习思维模式。

针对学生的心智模型,目前有效的教学方法共有四种:认知冲突(cognitive conflict)、桥接(bridging)、限制(restricting the frame)和多种表征(multiple representations)。前两种方法主要利用了学生的先验知识,认知冲突将错误的直觉与物理知识相连接,又称反直觉教学,典型物理情境如图1所示^[7];桥接使用正确的直觉进行教学,有助于学生接受、理解未曾接触过的知识,引导他们树立自信心理,重视基础、实践和形象知识的积累,两种教学方法都能够使学生更好地掌握知识^[8,9]。限制和物理模型思想类似,指的是把实际问题理想化,忽略次要因素,突出主要因素,得到简洁的物理规律。多种表征则要求教师在教学过程中同时使用文本、方程、表、图等形式。教师应当基于以上教学方法开展活动,帮助学生对知识进行重复学习、反思和整合,构建出有效且科学的心智模型。

如图所示,质量为 M 的物体悬挂在绳 X 上,另一根相同的绳 Y 连接到物体的底部。

现用足够大的力将绳 Y 快速向下拉。试问:哪根绳子会先被拉断?

A. X B. Y C. X 和 Y 同时被拉断

答案: B. 解析: 将绳 Y 快速向下拉,绳 X 的张力来不及变化,因此绳 Y 先被拉断。



图1 认知冲突教学的典型物理情境

针对元认知,学生学习物理时元认知上的困难主要体现在:(1)不能自觉地使用有效的学习策略;(2)缺乏对物理学习的有效监控。加州大学伯克利分校的教授 Alan Schoenfeld 开发了一种教学方法,教师可从中学会如何提供明确的指导帮助学生锻炼元认知能力。Schoenfeld 在教室的墙

上书写了三个元认知问题:(1)你在做什么?你能具体描述一下吗?(2)你为什么要做?它和解决方案的关系是什么?(3)它有什么用?当你得到结果时,你会如何处理?学生在学习时需要不断地回答这三个问题,思考自己的思考过程。实践证明,这种方法加强了学生的判断力和对思维过程的控制力^[10]。

2 教学评价:反馈与创新

2.1 给出学生学习反馈

Redish 认为,学生在学习物理时遇到的主要困难可能隐藏在他们对作业题目的“错误”答案中,教师需要认真批改学生的平时作业,给出真实、详细的反馈,帮助他们理解概念、获得技能。国内中南大学的《大学物理》教学团队发现,加强对平时作业的反馈有助于提升学生学习兴趣,培养学生自主学习乃至研究式学习的能力^[11]。随着高等教育的急剧扩张,高校教师人数捉襟见肘,每人负责的班级规模变大,教师难以全身心地投入到分析学生作业的工作中,这就要求课程助教具有丰富的经验和学识,协助教师对学生的思考给出反馈。

为了保证反馈的有效性,教师首先要做到的是及时批改并返还作业,以免学生忘记自己的思考过程。如 Redish 的第三条教学法则:“教师能给学生的最有用的帮助之一就是针对他们的思考给出详细的反馈——在一个学生会注意到并利用反馈的环境中。”在布置作业时,教师应选择能够真正锻炼学生解决问题能力的题目,问题情境应该和现实世界相似,不规定变量名称,不忽略无关信息,也不明确规定解题步骤。另外,给核心题目标记上“期末考试原题”能够更有效地帮助学生理解学习重点与难点。

近几年,随着移动设备的普及和智能化程度的提高,基于自备设备(如智能手机,平板电脑)的课堂反馈系统(student response system)在一定程度上加强了教师对学生的反馈效率^[12],当教师在课堂中提问时,学生可直接通过课堂反馈系统提交答案得到系统的反馈,同时教师也可根据系统的分析主动调整教学过程。

2.2 得到教师教学反馈

Redish 指出,学生分析物理的方式可能与教师所期望的完全不同^[13]。教师需要通过了解学生真实的想法来检查学生对所学知识的掌握程度和运用能力,发现教学中的问题和薄弱环节,改进教学工作^[14]。Redish 的第四、五、六条教学法则都与之相关,如第四条法则强调:“教师应尽可能多地了解学生的想法”;第五条法则为“当学生向教师提问或寻求帮助时,不要马上回答。教师应先问他们问题,看看自己对他们疑问的假设是否正确”;第六条法则强调:“想让学生学到什么,就要考他们什么”。

一般获得学生反馈的方法有以下几种:(1)观察学生在与教师交流时的表现;(2)通过调查或问卷衡量学生的满意度;(3)布置具有干扰项的客观题或论述式的主观题评价学生的学习情况。第一种观察方法是教师了解教学效果的重要途径,但在和学生交流时,教师必须要注意不能“一厢情愿”,特别是在答疑时,不能直截了当、单刀直入地回答学生的问题。一些恰到好处的反问,例如“你能解释一下你的困惑吗”或者“你为什么这样认为”通常会产生大量信息,帮助教师理解学生真正的疑问。第二种调查满意度的方法是最简单、常用的方法,但满意度无法直接反应学生的学习情况。第三种布置客观题的方法容易实施,但需要教师付出大量努力才能保证客观题的有效性。而布置主观题的方法可以较完整地呈现学生的思维,但要求教师付出大量时间和精力批改答案。

2.3 多元题型

为了实现教师和学生之间的双向反馈,同时真正帮助学生构建出有效且科学的心智模型、发展更复杂的学习思维模式,Redish 介绍了八种考试题型,通过激活学生不同的知识与技能,引导他们更深入地思考物理学。

(1) 选择题和简答题(Multiple-choice and short-answer questions)。评分简单,适应面广,但学生的得分情况往往会优于实际学习情况,要求教师精心构造选项。如选择题可以是图 2 类型;也可以是填空题,如:一大块铁在桌子上静止。把它移到桌子上的一桶水里后,铁沉在了桶的底

部。当铁在桶底时,它受到的合力_____它在桌子上受到的合力(填“大于”“小于”或“等于”)。

一本书搁在桌上。下列哪一种力作用在这本书上?

1. 向下的重力
2. 桌子提供的向上的力。
3. 由大气压强引起的向下的合力。
4. 由大气压强引起的向上的合力。

(A) 1 (B) 1, 2 (C) 1, 2, 3 (D) 1, 2, 4 (E) 没有力

图2 选择题的典型例题

(2) 多选多答题 (Multiple-choice multiple-response questions)。在相同的物理情境下, 考验学生进行大量思考和推理的能力。要解决图3所示的典型例题, 学生必须很好地掌握位移和速度的概念, 并能够清楚地区分速度和速率。

四只不同的老鼠(标记为A、B、C和D)在三角形迷宫中行走, 从左下角开始, 沿着箭头的路径走, 各自所花的时间如下图所示。在abcd项目后记下符合描述的老鼠字母。

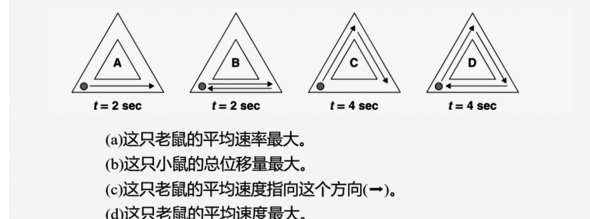


图3 多选多答题的典型例题

(3) 多种表征对应题 (Representation-transformation questions)。理解并处理物理学中使用的多种表征对于学生来说是一个相当大的挑战, 但这也是他们从物理学习过程中获得的最有价值的通用技能之一。图4所示的题目要求学生将描述物理情境的文字表述与纵坐标未知的图表相匹配, 引导学生深入思考物理变量的含义。

一个物体被夹在做匀速圆周运动的圆盘的边缘上。在 $t=0$ 时, 它的位置和速度如图。分别确定 A-F 中哪一个图可以代表 a-f 项目。

- (a) 物体速度的x分量
- (b) 物体位置与x轴的夹角
- (c) 物体位置的x分量
- (d) 物体的角速度
- (e) 物体的速度
- (f) 使物体作圆周运动的力的y分量

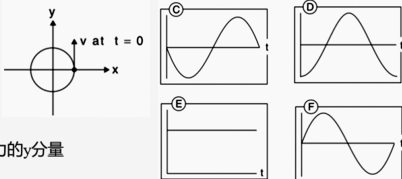


图4 多种表征对应题的典型例题

(4) 排序题 (Ranking tasks)。易于评分且结果有效, 容易引导学生调动推理能力。在霍夫斯

拉特大学的教授 David Cassidy 编纂的大学物理教材《Understanding Physics》中, 许多练习题都是排序题^[15], 如图5所示。

下图中有5块积木。积木的体积相等, 质量不同。将它们放置在一个装满水的水箱中, 积木2和5的位置如下图。在图上画出你认为的积木1、3、4静止的位置。(积木之间的质量差异较大)

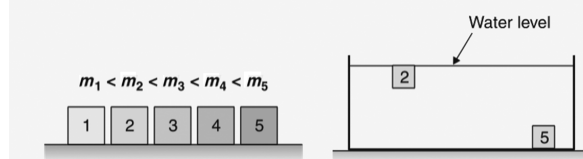


图5 排序题的典型例题

(5) 基于文本的推理题 (Context-based reasoning problems)。使用文本描述一个合理且有趣的现实情境, 要求学生必须使用物理原理进行分析, 可利用广告、电视剧和电影中存在物理学错误的日常例子, 如图6所示。

在电影《侏罗纪公园》中, 有这样一个场景: 参观团队被困在厨房里, 恐龙在门的另一边。古生物学家把肩膀压在靠近门中央的地方, 试图把恐龙挡在门外。植物学家把她的背靠靠近门铰链的地方, 因此她拿不到地上的枪。如果古生物学家移到门的外缘, 而植物学家去拿枪, 他们的处境会改善还是恶化? 估计他们施加在门上的扭矩的变化。



图6 基于文本的推理题的典型例题

(6) 估计题 (Estimation problems)。经典问题是由诺贝尔物理学奖得主 Enrico Fermi 提出的“芝加哥有多少名理发师”, 估计题要求学生练习和应用比例推理、处理大数、思考有效数字以及量化他们的现实经验。如: 估计夏天时, 一个典型的郊区房子前的草坪里有多少根草。学生需要写下自己的推理过程, 例如, “假设一平方厘米的草坪里有 10×10 根草, 那么一平方米的草坪里就会有 $10 \times 10 \times 10000$ ”。

(7) 定性题 (Qualitative questions)。有效地引导学生思考物理概念, 将他们在现实世界中的个人经历与在课堂中学习的物理知识联系起来, 并且减少计算能力的干扰, 帮助教师真实评估学生的学习情况。典型例题如图7所示。

(8) 作文题 (Essay questions)。清晰地揭示学生在理解物理概念上遇到的困难, 如: 这学期我们学习了电场和磁场。解释为什么要引入场的概

念,并对电场和磁场进行分析比较,讨论至少一个相同点和一个不同点,如图 7 所示。

在下图所示的理想电路中,所有的灯泡和电池都是一样的。排列灯泡的亮度。

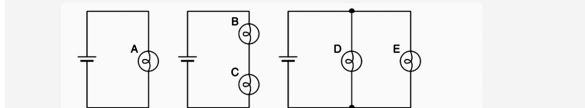


图 7 定性题的典型例题

3 教学过程:关心与尊重

Redish 主张一堂好课的重要组成部分是亲近的师生关系,而要拉近师生之间的距离,教师就要向学生展示关心与信任。Redish 建议教师尽可能多地记住学生的名字。即使教师只知道课堂上提问的学生的名字,也会给其他学生留下教师认识大部分学生的印象。针对教学过程,Redish 提出的第七、八、九教学法则分别是:“永远不要在课堂上贬低学生的发言或让学生难堪”“让你的学生感受到你对他们的关心与信任”“倾听学生”。

3.1 课堂提问

Redish 认为,教师教学过程的关键组成部分是课堂提问,提问是师生之间传递知识和思想交流的纽带,在课堂教学中起着不容替代的作用^[16]。课堂提问也能有效提高学生的参与度,因为他们需要通过真正的思考来回答。但是在实际的大学课堂中,大多数教师的提问是一种形式主义,教师不愿意等待学生回答,而是选择最简单的解决方案——自己回答。一旦学生们知道教师会这样做,他们就会倾向于等着教师说出答案而不是自己思考。所以,教师一定要让学生养成回答课堂提问的习惯。一方面,教师可以重复问题或者随机选择学生回答,来表明自己确实想要得到答复;另一方面,教师还必须让学生相信回答问题不是痛苦的,不会让自己在教师和同学面前显得愚蠢,因此教师一定要尊重学生,不否定或者忽略学生的发言。

3.2 师生关系

Redish 注重培养亲近的师生关系,他提出教师在教学过程中要尊重、关心学生。尊重学生在

教师作为“专家”、学生作为“学习者”的模式下并不容易做到。首都师范大学的教授王陆^[17]认为,教师一直独占课堂的主体地位,阻碍了课堂教学的提质提效,师生之间应该形成一种主体与主体的高级协同的对话关系,带动课堂教学从单主体的自利性向主体间的互利性对话转向。要实现这种主体转向,教师就必须改变信念,真正尊重学生。同时,教师应认识到关心学生是自己的义务。《中华人民共和国教师法》第十条第四项规定教师应当“关心、爱护全体学生,尊重学生基本权利和人格尊严,促进学生德智体美劳全面发展”。2018 年发布的文件《中共中央国务院关于全面深化新时代教师队伍建设改革的意见》^[18]中,也明确要求广大教师以德立身、以德立学、以德施教、以德育德,坚持教书与育人相统一、言传与身教相统一、潜心问道与关注社会相统一、学术自由与学术规范相统一,争做“四有”好教师,全心全意做学生锤炼品格、学习知识、创新思维、奉献祖国的引路人。

为了帮助教师提高教学过程的互动性,Redish 总结了四种小技巧:(1)提出学生感兴趣的问题;(2)引导学生互相讨论,而不是直接解答疑问;(3)组织学生共同解决基本概念的理解问题并安排学生展示;(4)少做题,精做题,避免盲目刷题。使用这些技巧时的关键要素是沟通,而在实际的教学沟通中,最重要的是教师能够无条件地、全身心地、共情地倾听^[19]。教师需要设置环境,倾听真实声音;保持敏感,倾听全部信息;时时思考,正确理解信息;耐心等待,鼓励学生表达;注重反馈,提升倾听质量^[20]。

4 Redish 的主要研究及贡献

自 1994 年开始,Redish 专注将认知论引入大学物理教学中,这也是《Teaching Physics with the Physics Suite》一书中的主要内容。他通过深入研究神经、认知和行为科学,总结出了学生学习物理过程的理论框架^[21],鼓励教师基于该理论跳出内容教学的框架,从认知科学的角度设计教学实践,帮助学生发展工程师所需技能^[22],并利用为期五年的教学实验证明认知科学在物理教育中的有

效性^[23]。

自2021年5月开始,Redish在《The Physics Teacher》杂志上陆续发表了6篇有关在物理教学中使用数学的文章。如在文章《Using Math in Physics: 4. Toy models》^[24]中,Redish提到,当利用高度简化的物理模型分析复杂系统时,使用数学运算可以帮助学生接受并理解简化模型的意义与价值。

Redish一直积极参与物理教育研究,他是马里兰大学物理教育与技术项目(Maryland University Project in Physics Education and Technology)和综合统一物理学习环境项目(Comprehensive Unified Physics Learning Environment)的创始人。他和他的合作者对物理教育中计算机^[25]的使用、学生物理思维的心智模型、学生期望和认知论在物理学习中的作用以及物理教学中的跨学科实践^[26]等研究领域都做出了卓越贡献。

5 结语

在我国目前的物理教学研究领域中,也存在基于心智模型的教学实践,其在有效建构认知和促进思维发展方面具备优势^[27],但大多是针对中等教育进行的研究,大学物理教学工作中认知学的内容较少,主要出现在深度学习^[28]的有关研究中。这也是Redish的九条教学法则的价值所在。它启示我们,在大学物理课程的教学过程中,在教学目标上,教师应当强调教学本质,帮助学生构建有效且科学的心智模型,发展复杂的学习思维模式;在教学评价上,教师需要采用多元的考试题型,激活学生不同的知识与技能;在教学过程上,教师应当注重师生关系,尊重、关心学生。

参 考 文 献

- [1] REDISH E F. Teaching Physics with the Physics Suite [M]. John Wiley & Sons, 2003.
- [2] REDISH E F, SAUL J M, STEINBERG R N. Student expectations in introductory physics[J]. American Journal of Physics, 1998, 66: 212-224.
- [3] NORMAN D A. Some observation on mental models: Mental Models[M]. Hillsdale: Erlbaum, 1983: 7-14.
- [4] VOSNIADOU S, BREWER W F. Mental models of the Earth: A Study of Conceptual Change in Childhood[J]. Cognitive Psychology, 1992(24): 535-585.
- [5] 汪玲, 郭德俊. 元认知的本质与要素[J]. 心理学报, 2000(4): 458-463.
WANG L, GUO D J. The Nature and Components of Metacognition[J]. Acta Psychologica Sinica, 2000(4): 458-463. (in Chinese)
- [6] 夏雪梅, 杨向东. 核心素养中的“学会学习”意味着什么[J]. 课程. 教材. 教法, 2017, 37(4): 106-112.
XIA X M, YANG X D. How do We Perceive the “Learning to Learn” of the Key Competency[J]. Curriculum, Teaching Material and Method, 2017, 37(4): 106-112. (in Chinese)
- [7] BALTA N, ERYILMAZ A. Counterintuitive Dynamics Test[J]. International Journal of Science and Mathematics Education, 2017, 15(3): 411-431.
- [8] SHAFFER P S, MCDERMOTT L C. Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity[J]. American Journal of Physics, 1992(60): 1003-1013.
- [9] CLEMENT J J. Expert novice similarities and instruction using analogies[J]. International Journal of Science Education, 1998(20): 1271-1286.
- [10] SCHOENFELD A H. Mathematical Problem Solving[M]. Academic Press, 1985.
- [11] 周聪华, 杨兵初, 彭政, 等. 强化过程考核, 提升大学物理学教学质量[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 81-86.
ZHOU C H, YANG B C, PENG Z, et al. Upgrading teaching quality of college physics by assessing the learning processes of students[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 81-86. (in Chinese)
- [12] 张睿, 王祖源, 胡萃, 等. 课堂反馈系统在混合式教学中的应用[J]. 物理与工程, 2017, 27(S1): 1-4.
ZHANG R, WANG Z Y, HU C, et al. Adoption of student response system in blended learning[J]. Physics and Engineering, 2017, 27(S1): 1-4. (in Chinese)
- [13] REDISH E F, SCHERR R E, TUMINARO J. Reverse engineering the solution of a “simple” physics problem: Why learning physics is harder than it looks[J]. The Physics Teacher, 2006, 44(5): 293-300.
- [14] 周战荣, 赵云芳, 沈晓芳. “大学物理”课程考试改革探索与实践[J]. 物理与工程, 2018, 28(S1): 136-139.
ZHOU Z R, ZHAO Y F, SHEN X F. Exploration and practice of examination reform in college physics[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(S1): 136-139. (in Chinese)
- [15] CASSIDY D, HOLTON G, RUTHERFORD J. Understanding physics[M]. Springer New York, 2002.

- [16] 黄发良, 杨倩, 闭应洲, 等. 基于深度学习的教师课堂提问方式[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 43-50.
- HUANG F L, YANG Q, BI Y Z, et al. Teacher's classroom questioning based on deep learning[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2022, 38(5): 43-50. (in Chinese)
- [17] 王陆, 张敏霞, 冯涛. 课堂提问主体转向的机理分析[J]. 课程. 教材. 教法, 2022, 42(8): 107-114.
- WANG L, ZHANG M X, FENG T. Mechanism analysis of the subject turning of classroom questioning[J]. Curriculum, Teaching Material and Method, 2022, 42(8): 107-114. (in Chinese)
- [18] 中共中央国务院关于全面深化新时代教师队伍建设改革的意见[N]. 人民日报, 2018-02-01(001).
- [19] FLANDERS N. Analyzing Teaching Behavior: Reading [M]. Addison-Wesley, 1970.
- [20] 李如密, 宋立华. 课堂教学倾听艺术探微[J]. 课程. 教材. 教法, 2009, 29(11): 30-34.
- LI R M, SONG L H. Exploration into the listening arts in classroom teaching [J]. Curriculum, Teaching Material and Method, 2009, 29(11): 30-34. (in Chinese)
- [21] REDISH E F. A theoretical framework for physics education research: Modeling student thinking[J]. Proceedings of the International School of Physics, 2004, 1-63.
- [22] REDISH E F, SMITH K A. Looking beyond content: Skill development for engineers[J]. Journal of Engineering Education, 2008, 97: 295-307.
- [23] REDISH E F, HAMMER D. Reinventing college physics for biologists: Explicating an epistemological curriculum [J]. American Journal of Physics, 2009, 77: 629.
- [24] REDISH E F. Using Math in Physics: 4. Toy models[J]. The Physics Teacher, 2021, 59: 683.
- [25] REDISH E F. Are computers appropriate for teaching physics[J]. Computers in Physics, 1993, 7(6): 613.
- [26] DREYFUS B W, REDISH E F, et al. Students' Interdisciplinary Reasoning about "High-Energy Bonds" and ATP [J]. AIP Conference Proceedings, 2013, 1513: 122-125.
- [27] 高翔. 以科学模型的进阶推进心智模型的发展——过程模型的“建构—检验—评价”[J]. 中学物理教学参考, 2022, 51(25): 15-23.
- GAO X. Promoting the development of mental model with the advance of scientific model: 'Construction-Assessment-Evaluation' of process model[J]. Teaching Reference of Middle School Physics, 2022, 51(25): 15-23. (in Chinese)
- [28] 陈玉洁, 黄致新, 詹璇, 等. 基于变构学习模型的大学物理深度学习研究——以大一学生解决某一力学问题为例[J]. 物理与工程, 2022, 32(3): 41-45, 49.
- CHEN Y J, HUANG Z X, ZHAN X, et al. Research on deeper learning of college physics based on allosteric learning model—Taking freshmen to solve a mechanical problem as an example[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(3): 41-45, 49. (in Chinese)